

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppiseaduste valdkond
Tehnoloogiasinstituut

Ahti Saar

**STAATILISE TÕMBEJÕU STEND MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKITE
ELEKTRIMOOTORITELE**

Magistritöö (30 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Elektroonikaspetsialist Teet Tilk

Tartu 2017

Resümee

Staatilise tõmbejõu stend mehitamata õhusõidukite elektrimootoritele

Tehnoloogia arenedes võetakse kasutusele üha rohkem meetodeid, mis võimaldavad lihtsustada inimeste tööülesandeid ning neid ka osaliselt või täielikult automatiseerida. See aga omakorda tähendab, et kasutusele võetavatest seadmetest ja süsteemidest peab olema selge ülevaade ning parameetrid peavad olema täpselt teada.

Paratamatult tekib kiire arengu ja nõudluse faasis mitmeid seadmete või süsteemi komponentide tootjaid, kes ei pruugi kvaliteedile väga suurt rõhku panna ning seeläbi jõuavad turule küsitava väärtusega seadmed. Üheks selliseks tehnoloogiavaldkonnaks on mehitamata õhusõidukid ja nende kasutamine erinevate ülesannete täitmiseks.

Antud lõputöö eesmärk on luua süsteemi prototüüp, millega on võimalik testida mehitamata õhusõidukite elektrimootoreid ja nende propellereid. Töö esimeses osas antakse ülevaade teoreetilistest alustest, millele lõputöö toetub (staatiline tõmbejõud, propelleri teooria, kasutatavad mootorid). Teises osas kirjeldatakse probleemi juba lähemalt ning lõpuks tuuakse välja autori poolt loodud süsteem. Kirjeldatakse loomise etappe, komponente ning ka testimist. Töös võrreldakse plast- ja puitpropellereid ning tuuakse välja tõmbejõu erinevused sõltuvalt propellerite parameetritest ning mootori pööretest. Kirjeldatud on ka edasisi plaane seoses prototüübi arendamisega tooteni.

CERCS: T120 Arvutitehnika

Märksõnad: mehitamata õhusõidukid, propeller, staatiline tõmbejõud, UAV, LabVIEW

Abstract

Static thrust test stand for UAV electric motors

As technology improves, it introduces more and more techniques that allow people to simplify, partially or fully automate tasks, which were previously done by humans. This in turn means that we must have a clear overview of the devices and systems and measured parameters should be as accurate as possible. If we construct complex systems, every individual part must be examined and measured, so we can be sure how it acts under different conditions.

Inevitably, in a rapid development phase and in a situation where we need large number of devices or system components in a relatively short time frame, there will be manufacturers, who do not put much emphasis on the quality and thus some items with questionable quality reach to the market. One such technology field is UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) and their use for various purposes.

This thesis aims to construct a system prototype, which would be able to test unmanned aircraft electrical motors and their propellers. In the first part, author gives an overview of the theoretical bases on which the thesis is based (static thrust, propeller theory, motors used on UAVs). The second part describes the problem in more detail. Finally, the author outlines the idea of the system. Describes the steps of programming, setting up, as well as testing components. Also, author describes further plans regarding system development.

CERCS: T120 System engineering

Keywords: drone, ESC, LabVIEW, static thrust, UAV

Sisukord

Resümee	2
Abstract	3
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1. Sissejuhatus.....	9
2. Ülevaade mehitamata õhusõidukitest.....	11
2.1. Propeller.....	11
2.2. Staatiline ja dünaamiline tõmbejõud	12
2.3. Mehitamata õhusõidukitel kasutatavad jõuallikad	13
2.3.1. Sisepõlemismootorid.....	13
2.3.2. Elektrimootorid	13
3. Ülevaade probleemist.....	15
4. Autori lahendus	16
4.1. Riistvara.....	17
4.2. Riistvara ühendamine	22
4.3. Tarkvara.....	23
5. Tulemused.....	27
5.1. Süsteemi seadistamine	27
5.1.1. Jõuanduri seadistamine	27
5.1.2. Mootori pöörete kontroll	27
5.1.3. Kiirendusanduri seadistamine	28
5.1.4. Temperatuurianduri seadistamine	28
5.2. Testid erinevate propelleritega	29
5.3. Edasised plaanid	30
Kokkuvõte	32
Tänuavaldused	33
Viited.....	34
Lisad	36
1. Lisa – Mootori kinnituse joonis	36
2. Lisa – Jõuanduri signaali võimendamise elektroonikaskeem	37
3. Lisa – Programmi kood	37

4. Lisa – Programm	37
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	38

Jooniste loetelu

Joonis 1 - Kasutatav mootor SunnySky V2814-10 KV800	14
Joonis 2 - Projekti protsessijoonis	16
Joonis 3 - Projekteeritud mootorikinnitus	18
Joonis 4 - Kasutatav jõuandur	18
Joonis 5 - Wheatstone'i sild [12]	19
Joonis 6 - Jõuandur koos mootori ja kinnitustega	19
Joonis 7 - Prototüübi trükkplaat	20
Joonis 8 - Elektroonikasüsteemi plokk skeem	21
Joonis 9 - LabJack U6-PRO andmehõivesead.....	21
Joonis 10 - Terviklik konstrueeritud süsteem	23
Joonis 11 - Programmi kasutajaliides.....	24
Joonis 12 - Tarkvara voodiagramm.....	26
Joonis 13 - Erinevate propellerite poolt tekitatav tõmbejõud sõltuvalt mootoripööretest.	30

Tabelite loetelu

Tabel 1 - Mootori pöörete kontroll.....	28
---	----

Lühendid, konstandid, mõisted

AC/DC – *Alternating current/Direct current* – vahelduvvool/alalisvool

EMI – elektromagnetiline interferents

ESC - *Electronic Speed Control* – harjadeta mootori kontrollier

FAA – *Federal Aviation Administration* – Ameerika Ühendriikide lennuamet

Inrunner – harjadeta mootori tüüp, mille puhul on rootoriks mootori sees paiknev osa

KV – harjadeta mootori parameeter, mis määrab ära, mitu pööret teeb mootor 1 völdi kohta

Outrunner – harjadeta mootori tüüp, mille puhul on rootoriks mootori väline osa

PWM – *Pulse Width Modulation* – pulsilaiusmodulatsioon

RMS – *Root Mean Square* – ruutkeskmise väärtus, efektiivväärtus

UAV - *Unmanned Aerial Vehicle* – mehitamata õhusõiduk

USA – *United States of America* – Ameerika Ühendriigid

1. Sissejuhatus

Autori hinnangul on käesoleval ajal enamik inimesi kokku puutunud sõnaga “droon”. Kokkupuude võib olla kaudne (näiteks ajakirjanduses leiduv artikkel, milles kirjeldatakse olukorda, kus tänu droonile suudeti päästa metsa eksinud mees) või siis otsene. Siia alla võime arvestada kõik mehitamata õhusõidukite omanikud. Avaldatud statistika ja prognooside põhjal võib väita, et neid omanikke tekib juurde ning mehitamata õhusõidukite sektor laieneb jõudsalt. Drone Life’i artikli põhjal saab öelda, et aastaks 2020 on mehitamata õhusõidukite valdkonna väärtuseks USA-s 127 miljardit dollarit. Lisaks sellele tõuseb droonide koguarv 7 miljonini (2,7 miljonit kommertskasutuses ning 4,3 miljonit hobikasutuses). [1]

Just vaba aja veetmisel kasutatavate UAV-de arv mitmekordistub ning selle valguses on nii USA lennuamet (FAA) kui ka Euroopa lennuohutusamet välja töötamas konkreetsemaid regulatsioone, et ühest küljest tagada ohutus kontrollitud õhuruumis, teisalt koolitada operaatoreid, kes droone maa pealt juhivad.

Global Research’i artikli väitel oli juba 2012. aastal ainuüksi USA-l militaarotstarbelisi õhusõidukeid 18261, millest droone 7494 ehk 41%. Mehitamata õhusõidukite kasutusvaldkonnad järjest laienevad. Kui esimesed UAV-d tegid enamasti sõjalisi operatsioone või kasutasid neid fotografeerimise eesmärgil, siis tänaseks päevaks on tegevusvaldkonnad juba märksa laiemad (näiteks meteoroloogia, põlengute kustutamine (monitooring), elektriliinide inspekteerimine pärast tormi, pakivedu, põllumajanduses erinevad monitooringud) [2]. Lisaks on riigihangete registrist leitavad mitmed hanked, milles otsitakse erinevaid mehitamata õhusõidukeid. Näiteks Eesti Maaülikool on välja kuulutanud riigihanke, milles soovivad multirootoreid ja lennukid, mis omavad tehnilises kirjelduses üsna kindlaid nõudeid [3].

Seoses eelnevalt kirjeldatud olukordades droonide rakendamisega, on tekkinud murekohad, mis hõlmavad nii UAV üksikuid komponente kui ka tervikut. Nimelt, suurenenud nõudluse järel on Aasias mitmeid tootjaid, kelle lõpptoodang ei pruugi vastata komponendiga kaasa antud dokumentatsioonile. Veel täpsemalt öeldes – hangitud mehitamata õhusõidukite elektrimootorid ei pruugi arendada piisaval määral tõstejõudu. Võib tekkida olukord, kus inimene valmistab enda soovitud parameetrite järgi oma UAV ning lennutab seda muutlikes ilmaoludes, aga ühel hetkel pole enam tõstejõud piisav, et UAV massi õhus hoida ning viimane kukub alla. Heal juhul on kahju varaline, kuid olukord võib ohtu kujutada ka elusolenditele ja ümbritsevale keskkonnale.

Taolise olukorra tekke tõenäosuse vähendamiseks tuleks leida võimalus, kuidas mõõta konkreetsemalt mootorite tõstejõudu mingi kindla propelleriga ning täiendada võimaluse korral võiks keskkonnatingimusi jälgida. Igale mootorile tuleks leida optimaalne propeller, mis vastaks juba konkreetse õhusõiduki parameetritele (suurus, mass).

2. Ülevaade mehitamata õhusõidukitest

2.1. Propeller

Propelleriks nimetatakse pöörlevat aerodünaamilist seadet, mille eesmärk on muuta mootori pöördemoment lineaarseks tõmbeks või tõukeks [4]. Propellerid erinevad oma ehituselt nii labade arvu, materjali, pöörlemissuuna kui ka labade seadenurga muudetavuse järgi. Lennunduses on levinud kuni kuuelabalised propellerid. Materjaliks võib olla kas puit, metall või komposiit. Kui labad moodustavad rummuga ühe terviku, siis sellist propellerit nimetatakse püsisammuga propelleriks. Kui aga laba seadenurka on võimalik muuta, siis on tegemist muutuva sammuga (seadenurgaga) propelleriga. Nende ehitus on oluliselt keerulisem, kuid saadav efektiivsus ka suurem, sest efektiivne tõmbejõud on võimalik saavutada erinevate kiiruste ja keskkonnatingimuste korral. [4]

Propelleri laba on justkui pöörlev tiib ning seetõttu kasutatakse laba kirjeldamiseks tiivaga sarnaseid parameetreid – plaan, keskmine aerodünaamiline kõõl, külgsuhe, pindala. Lisaks eelnevatele, on propelleri juures kasutusel ka mõiste täitetegur, mis näitab, kui suure osa labade poolt tekitatava ringi pindalast moodustavad labade pindala. [4]

Täitetegur avaldub järgneva valemiga 2.1 [4]:

$$C = \frac{S}{\pi r^2}, (2.1)$$

kus C on täitetegur;

S on labade kogupindala;

πr^2 on labade pöörlemisel tekkiva ringi pindala.

Siit selgub, et mida rohkem labasid propelleril on, seda suurem on täitetegur. Tegelikult labade arvu kasvades suurenevad ka propelleri üldmõõtmed (ehk pöörlemisel tekkiva ringi pindala suureneb) ning seetõttu täitetegur oluliselt ei kasva. Tänapäeval on enimkasutatavate propellerite täiteteguri suurus kuni 15%. [4]

Nagu eelnevalt mainitud, on propelleri ülesanne tekitada tõmbe- või tõukejõudu. See avaldub järgneva valemiga 2.2 [4]:

$$T = C_T \rho n^2 D^4, (2.2)$$

kus T on tõmbe- või tõukejõud;

C_T on tõmbekoefitsient;

ρ on õhu tihedus;

n on mootori pöörded;

d on propelleri diameeter.

Propelleri tõmbekoefitsient sõltub propelleri parameetritest (diameeter, samm, profiil jms). Propelleri tõmme on oluline, et leida kasulik võimsus ning sellest omakorda kiiruslik kasutegur. Kasulik võimsus avaldub järgneva valemiga 2.3 [4]:

$$N_{kas} = T v_l, (2.3)$$

kus N_{kas} on kasulik võimsus;

T on tõmme;

V_l on lennuki kiirus.

Siit omakorda saame leida lennundusliku kasuteguri η valemiga 2.4 [4]:

$$\eta = \frac{N_{kas}}{N_{mootor}}, (2.4)$$

Kus η on lennunduslik kasutegur;

N_{kas} on kasulik võimsus;

N_{mootor} on mootori võimsus.

Eelnevast selgub, et tõmbe suurus on ühest küljest oluline õhusõiduki massi planeerimisel, teisalt kasuliku võimsuse arvutamisel. On võimalik eristada staatilist ja dünaamilist tõmbejõudu. Antud lõputöö eesmärk on mõõta staatilise tõmbejõu suurust.

2.2. Staatiline ja dünaamiline tõmbejõud

Staatilist tõmbejõudu on võimalik mõõta olukorras, kus õhusõiduk (või selle mootor) on paigal ning liikuva õhuvoo tekitab ainult pöörlev propeller. Staatilise tõmbejõu leidmiseks peab teadma kolme põhiparameetrit: propelleri sammu, diameetrit ja pöörlemiskiirust. See on leitav järgneva valemiga 2.5 [5]:

$$T = 1,225 \frac{\pi \times (0,0254 \times d)^2}{4} \times \left(p \times 0,0254 \times s \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sek}} \right)^2 \times \left(\frac{d}{3,29546 \times s} \right)^{1,5}, (2.5)$$

kus T on tõmme (N);

d on propelleri diameeter;

p on propelleri pöörded;

s on propelleri samm.

Dünaamilise tõmbejõu puhul on õhusõiduk liikumas õhuvoolus ning lisaks eelnevatele parameetritele, tuleb arvestada ka õhuvoo kiirusega.

2.3. Mehitamata õhusõidukitel kasutatavad jõuallikad

2.3.1. Sisepõlemismootorid

Sisepõlemismootoritest kasutatakse mehitamata õhusõidukitel ottomootoreid. Ottomootorite kasutamisel tuleb silmas pidada olulisi faktoreid, mis mõjutavad selle kasutamist. Sisepõlemismootorid on üldiselt suurema massiga kui elektrimootorid, seetõttu tuleb propelleri valikul tuleb seda arvestada. Teisisõnu, lisanduv mass tuleb kompenseerida täiendava tõmbejõuga, mis on saavutatav suurema sammuga propellerit kasutades. Võttes arvesse mootori poolt saavutatavaid pöörded ning propelleri diameetrit ja sammu, siis on võimalik leida tõstejõud, mida antud mootor teatud pöörete juures olemasoleva propelleriga tekitada suudab. Üldiselt leiavad sisepõlemismootoriga mehitamata õhusõidukid kasutust valdkondades, mis eeldavad pikemat lennuaega ning suuremat lasti. Eesti ettevõtte poolt arendatud Theia lennuk suudab järjest lennata kuni 24 tundi [6]. Võrreldes elektrimootoritega, on sisepõlemismootorite poolt tekitatav müra oluliselt suurem ning seetõttu on teatud kohtades nende kasutamine piiratud või isegi keelatud. Siinkohal võib näiteks tuua erinevad suurüritused.

2.3.2. Elektrimootorid

Elektrimootorid leiavad väga laialdast kasutust UAV valdkonnas, kuna nende kasutamine on suhteliselt lihtne ning need on kerged ja odavad. Mehitamata õhusõidukitel leiavad kasutust harjadeta alalisvoolumootorid. Võrreldes harjadega alalisvoolumootoritega, on neil mitmeid eelised: suurem töökindlus (pole harju ja lamelle, mis kuluvad), suurem pöördemoment võimsusühiku kohta, kõrgem kaalu ja pöördemomendi suhe, vähem müra ja ka madalam elektromagnetilise interferentsi (EMI) tase, kuna rootoril puuduvad mähised [7]. Teisest küljest on sellise mootori juhtimine keerulisem ning nõuab eraldi kontrolleri (inglise keeles *electronic speed control* - ESC). Kontrolleri väljundiks on 3-faasiline vahelduvvool, millega pingestatakse pooluspaare. Kõrvuti asetsevad pooluspaarid pingestatakse vastupidise polarisatsiooniga, et saavutada veelgi suurem pöördemoment. Nimetatud olukorra puhul tõmbab üks mähis rootoril asetsevat püsimagneeti enda poole ning eelnev tõukab. Harjadeta alalisvoolumootorid jagunevad veel omakorda kaheks: *inrunner* ja *outrunner*. Esimeste puhul paikneb rootor mähhistest seespool, sarnaselt vahelduvvoolu asünkroonmootoriga. See lahendus tagab kõrgemad pöörded, kuid väiksema väände. Teisel juhul on mähis mootori sees, ning

püsimagnetist rootor väljaspool. Antud olukorras on pöörded madalamad. *Inrunner*-tüüpi mootorite puhul on mõnikord kasutusel ka reduktor, et suurendada väändemomenti pöörete vähendamise läbi.

Harjadeta mootorite valiku puhul tuleb arvestada nende füüsiliste mõõtmetega, lisaks sellele ka veel ühte parameetrit. Selleks on KV väärtus ehk pöörete sõltuvus sisendpingest. Antud süsteemis testimises olev mootor on SunnySky V2814-10 KV800 ehk esimesed numbrid määravad ära mootori üldised mõõtmed: staatori diameeter 28 mm, staatori kõrgus 14 mm, nominaalpinge 10V, 800 pööret minutis ühe voldi kohta. Lisaks on mõnel mootoril juurde lisatud N ja P väärtused. Antud mootori puhul on need 12N14P ehk staatoris on 12 mähist ja rootoril 14 püsimagnetit. [8], [9], [10]



Joonis 1 - Kasutatav mootor SunnySky V2814-10 KV800

3. Ülevaade probleemist

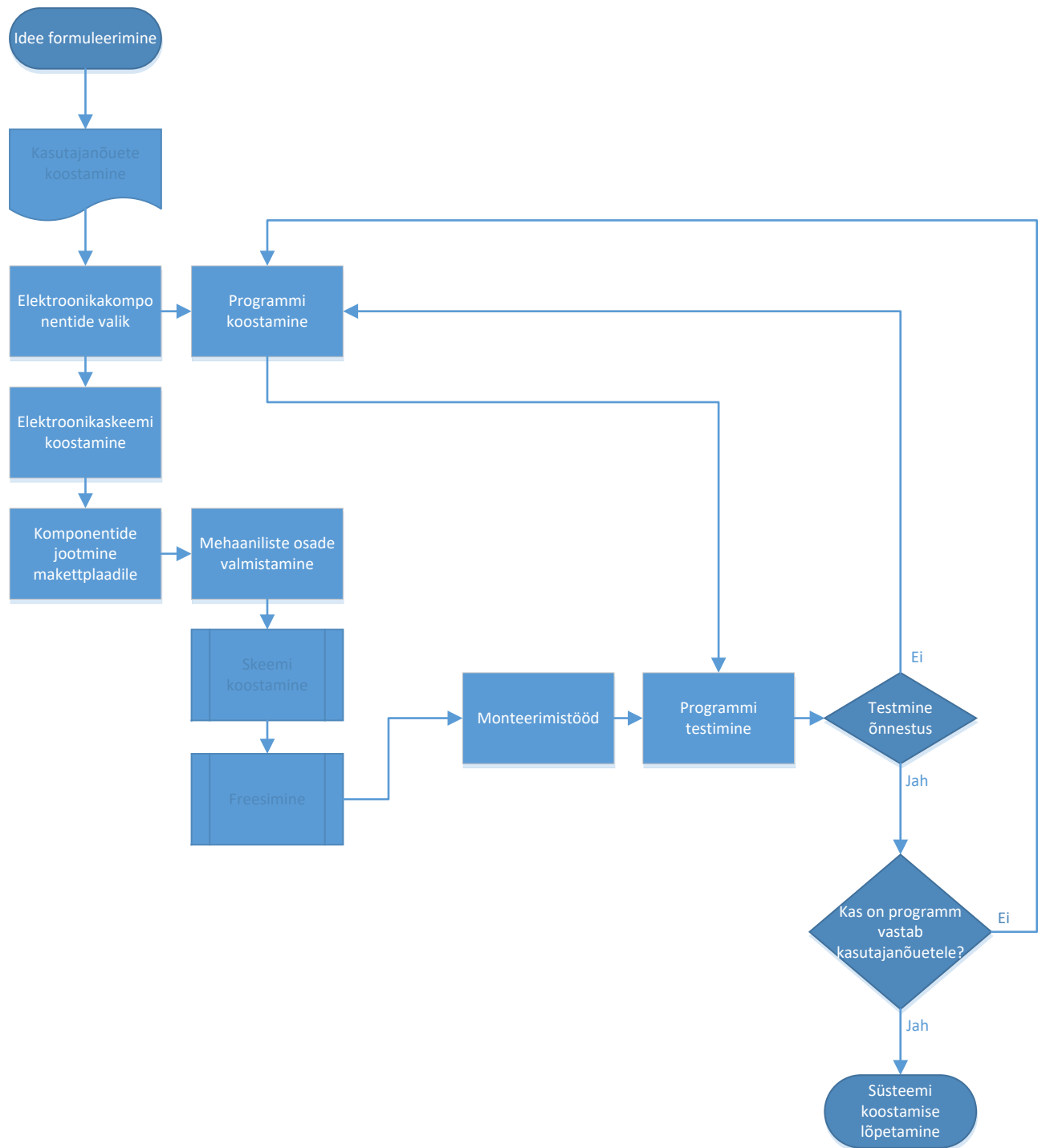
Seoses UAV valdkonna kiire arenguga viimastel aastatel, on tekkinud mitmeid mehitamata õhusõidukite komponentide tootjaid. See omakorda aga tähendab tihedamat konkurentsi ja madalamaid hindu toodetele. Antud juhul tarbija poolt vaadatuna on tegemist hea nähtusega, kuid suureneb ebakvaliteetse toodangu tõenäosus ning ka dokumentatsioon ja tugi võib olla puudulik. Mootoritega pannakse kaasa tüüpdokumendid, kuid nende parameetrid ei pruugi tegelikkusele vastata.

Seetõttu on väga keeruline konstrueerida õhusõidukit teadmata mootorite tegelikku tõstejõudu. Omades ülevaadet mootorite reaalistest parameetritest, on juba oluliselt lihtsam valida konstruktsiooni materjali ning kaasavõetavaid lisaseadmeid (näiteks kaamerat).

Kirjutamata reegli kohaselt peaks mootorite tõmme olema kaks korda suurem, kui on mehitamata õhusõiduki kaal koos lisaseadmetega. Ehk teisisõnu, UAV peaks olema suuteline hõljuma maapinna kohal kasutades ära poolt võimsust. Lisavõimsus võib kasulikuks osutuda keerulistes lennutingimustes – suurem tuulekiirus või agressiivsemad manöövrid. Sõltuvalt lennuvahendi kasutamise eesmärgist, võib tõmbe ja kaalu suhe olla suurem või väiksem. Näiteks pildistamisel tuleb lennata rahulikult ja seal võib tõmbe ja massi suhe olla väiksem kui 2:1, samas võidusõidu UAV-del peaks nimetatud suhe olema suurem. [11]

4. Autori lahendus

Lahenduse loomisel lähtuti järgnevast protsessijoonisest.



Joonis 2 - Projekti protsessijoonis

Pärast idee formuleerimist koostati kasutajanõuded ehk kriteeriumid, millele konstrueeritav seade vastama peab. See hõlmas nii füüsilisi mõõtmeid kui ka funktsionaalsust. Järgmises etapis valiti vajalikud elektroonikakomponendid, koostati skeem ning samal ajal alustati programmi

kirjutamisega. Edasi toimus elektroonikakomponentide jootmine makettplaadile ning tehti esimesed katsetused, sh kontrolliti jõuanduri tööd. Pärast esmaseid positiivseid tulemusi projekteeriti ja konstrueeriti mehaanilised osad. See etapp hõlmas endas mootori ning jõuanduri kinnituse valmistamist, samuti suurema raami tegemist, millele kinnituvad nii jõuandur koos mootoriga kui ka akud ja elektroonikaplokk. Paralleelselt toimus programmi täiustamine ja testimine. Pärast lõplikke monteerimistöid toimus suurem süsteemi funktsionaalsuse testimine ning hindamine, kas kasutajanõuded on täidetud ning seade vastab etteantud nõuetele.

4.1. Riistvara

Süsteemi üheks olulisemaks komponendiks on andmehõiveseade. Selle valikul lähtuti järgnevatest kasutajanõuetest:

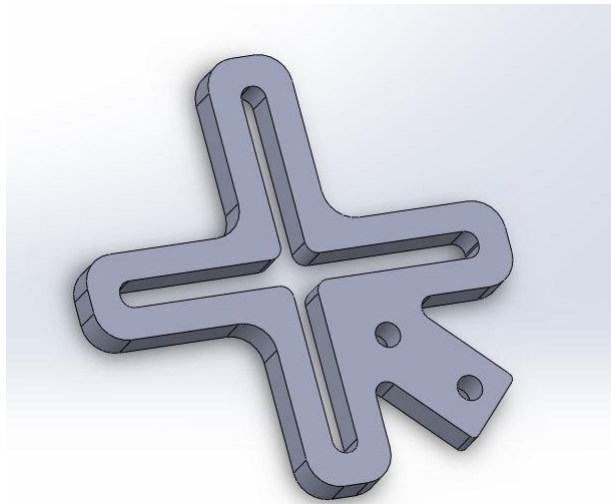
- vähemalt 7 analoogsisendit;
- ühilduvus LabVIEW tarkvaraga;
- sisemine loendur;
- taimeri väljund;
- reguleeritav analoogväljund;
- USB või võrguühendus arvutiga;
- toitepinge 5V või 12V;
- kompaktne suurus (maksimaalselt P x L x K 200x100x50 mm).

Seadme riistvaraline pool on võimalik jagada kaheks suuremaks alamosaks: mehaanika ja elektroonika.

Mehaanika alla kuuluvad:

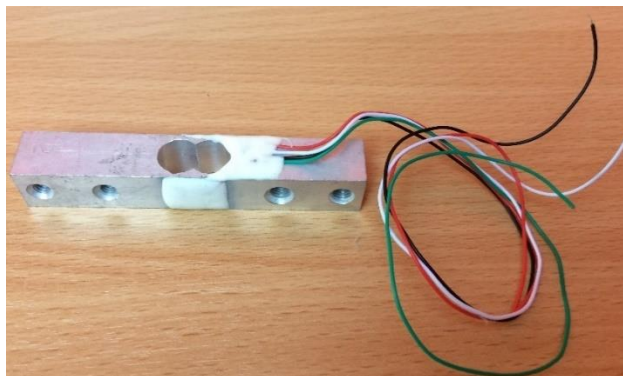
- mootor koos propelleriga;
- kinnitused;
- jõuandur.

Mootori kinnitus projekteeriti tarkvaras SolidWorks. Antud detaili kinnituse puhul oli nõueteks lihtsus, universaalsus ning materjali väike tihedus. Lihtsus seisneb selles, et mootori kinnitamine oleks võimalikult kiire, kuna testimise käigus on vaja mootoreid vahetada. Universaalsuse nõude tingis asjaolu, et sõltuvalt mootori suuruselt, muutub ka selle kinnituspunktide asukoht. Kuna tegu on mobiilse seadmega, siis kogumass pidi olema võimalikult väike. Materjaliks sai valitud 6082 alumiiniumsulam. Tegemist on seadmete ja masinate konstruktsiooniks mõeldud sulamiga, millel on väga hea korrosioonikindlus.



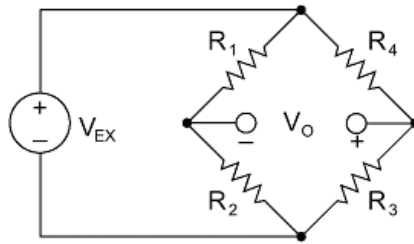
Joonis 3 - Projekteeritud mootorikinnitus

Jõuandur valiti enimlevinud kujuga, kuna kinnituspunktid on väga olulised. Seadme konstruktsioonis paikneb jõuandur mootori kinnituse ja raami vahel. Jõuanduri tööpõhimõtteks on takistuse muutus, mis on proportsioonis andurile avaldatud jõuga. Oluline on, et jõudu avaldatakse õiges suunas, st vastavalt anduril märgitule. Vastasel juhul pole tulemus korrektne ning eksisteerib oht andur lõhkuda.



Joonis 4 - Kasutatav jõuandur

Jõuanduri elektriline osa põhineb Wheatstone'i sillal. Nimetatud sildlülituse puhul on võimalik väga täpselt kindlaks määrata lülituses paiknev tundmatu takisti väärtus.

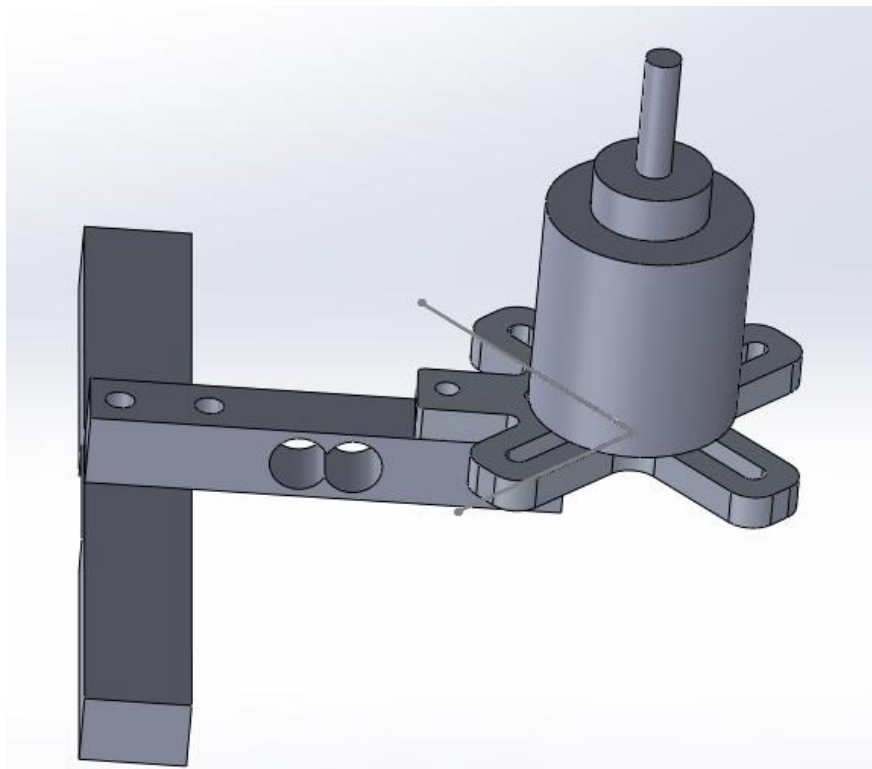


Joonis 5 - Wheatstone'i sild [12]

Takistite suhe avaldub valemiga 4.1:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}, (4.1)$$

Valemiga kirjeldatud olukorras on väljundpinge võrdne nulliga. Kui nüüd ühte takistit muuta või see asendada deformatsiooni mõõtmiseks ehitatud takistiga, siis väljundpinge muutus on vastavuses andurile rakendatud jõuga.



Joonis 6 - Jõuandur koos mootori ja kinnitustega

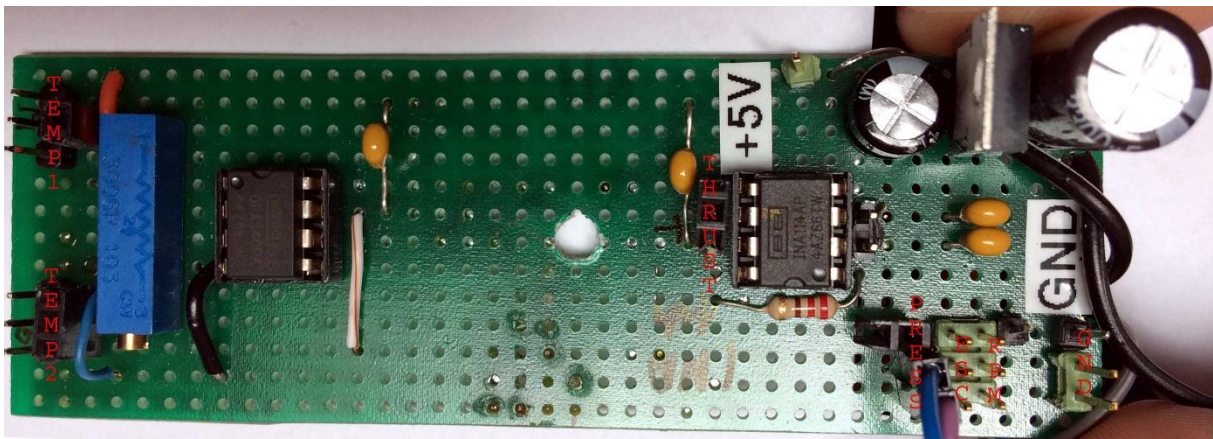
Elektroonika alla liigituvad:

- ühenduskaablid;
- trükkplaat koos elektroonikakomponentidega;
- LabJack andmehõivesead;

- toiteallikad ja pingeregulaatorid.

Ühenduskaablitest on kasutusel nii ühesoonelised makettlaua kaablid kui ka varjestatud võrgukaabel (FTP CAT5E). Varjestus tagab, et elektromagnetlainete rikkas keskkonnas on müra mõju minimaalne. Kahe eraldi võrgukaabli kasutamise tingis olukord, kuna 12-soonelist varjestatud kaablit polnud võimalik hankida. Makettlaua kaablitel olid juba vajalikud pistikupesad olemas ning see vähendas installatsiooni keerukust ning selleks kuluvat aega.

Jõuanduri väljundsignaali jaoks oli vaja luua signaalivõimendi. Prototüübi tegemise ajal valiti trükkplaadiks enamlevinud makettplaat, millel on eraldi voolurajad ning kolmesed saared komponentide ühendamiseks. Nimetatud lahendus võimaldas vähendada kaablite hulka trükkplaadil.

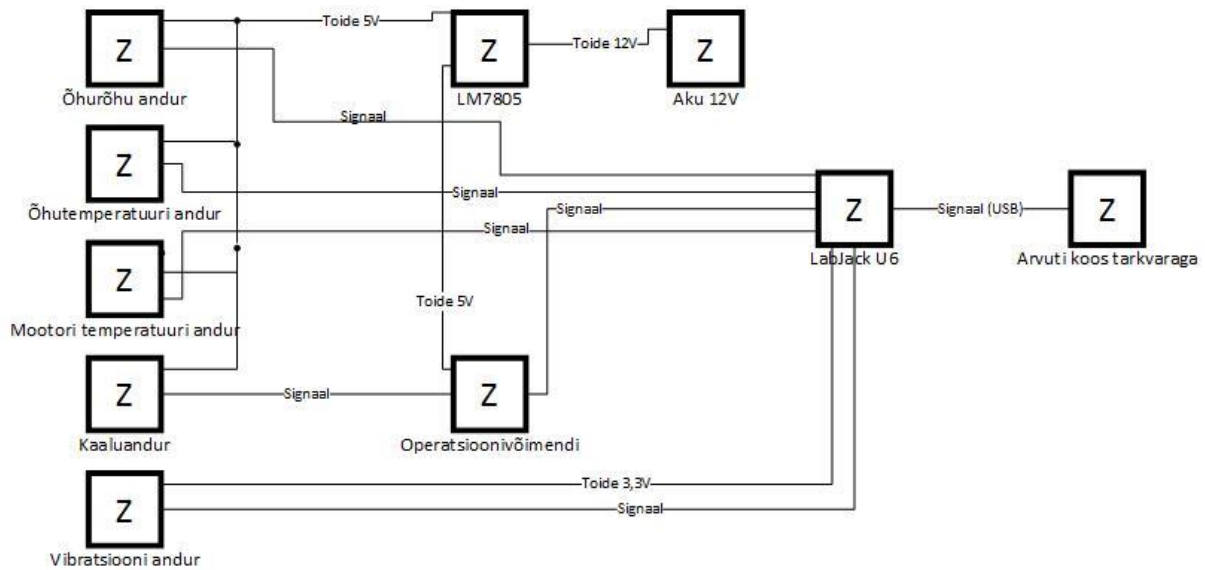


Joonis 7 - Prototüübi trükkplaat

Valitud komponendid olid järgmised:

- operatsioonivõimendi OPA340;
- integraalvõimendi INA114AP;
- keraamiline kondensaator 1 μF ;
- elektrolüütkondensaator 3300 μF ;
- pingeregulaator LM7805;
- takisti 220 Ω $\pm 5\%$;
- trimmer 1k Ω ;
- rõhuandur MPX4250A;
- temperatuuriandur LM35;
- kiirendusandur GY-61.

Seejärel paigutati vajalikud komponendid trükkplaadile ning joodeti. Trükkplaat puhastati räbustist.



Joonis 8 - Elektroonikastiiteemi plokk skeem

Andmehõiveseadmeks valiti LabJack U6-PRO. Ühest küljest tingis valikud varasem kogemus antud seadmega, kuid teisalt ka seadme parameetrid, mis võimaldasid andmete kogumise plaanitud kujul ellu viia. Nimetatud andmehõiveseadmel on kokku 14 analoogsisendit, neli taimerit ning kaks loendurit. [13]



Joonis 9 - LabJack U6-PRO andmehõiveseade

4.2. Riistvara ühendamine

Süsteemi põhikomponendid on:

- LabJack U6-PRO;
- USB kaabel A-B;
- mootori kinnitus koos jõuanduri ja kiirendusanduriga;
- kaabel 1 ja 2 koos D-SUB 39 pistikuga;
- elektroonikaplokk EP-1.

Täiendavateks komponentideks on:

- mootori kontrolleri (ESC);
- harjadeta mootor.

Täiendavaid komponente on võimalik vahetada vastavalt katsetele. Komponentide esmakordsel kokkupanemisel tuleb olla tähelepanelik, et kõik pesad-pistikud saaksid õigesti ühendatud.

Kaabel 1 tuleb ühendada elektroonikaplokki EP-1 järgnevalt:

- GND - kollane juhe (pesa);
- THRUST - roheline juhe (pistik);
- TEMP1 - punane juhe (pistik);
- PRESS - oranž juhe (pesa);
- TEMP2 - hall juhe (pistik);
- ESC - must juhe (pistik);
- RPM - roheline juhe (pesa).

Kaabel 2 tuleb ühendada kiirendusanduriga GY-61 järgnevalt:

- GND - must juhe;
- VCC - punane juhe;
- X-axis - sinine juhe;
- Y-axis - roheline juhe;
- Z-axis - kollane juhe.

Järgneval joonisel on kujutatud terviklik konstrueeritud süsteem. Suurema alumiiniumist sõrestikraami kasutamine on vajalik, kuna propelleri ees ja taga peaks õhuvoog takistamatult liikuma.



Joonis 10 - Terviklik konstrueeritud süsteem

4.3. Tarkvara

Seadme juhtimistarkvara loomisel kasutati visuaalse programmeerimise keskkonda LabVIEW. Nimetatud tarkvara võimaldab graafiliselt kirjeldada seoseid erinevate süsteemiosade vahel. Samuti on võimalik töödelda sisendandmeid ning muuta väljund kasutajale paremini mõistetavaks. Näiteks analoogsisendite puhul pole kasutajale kuigi informatiivne pingnivoo, kuid kui teisendada see temperatuuri või õhurõhu näiduks, siis on kasutajal oluliselt selgem ülevaade hetkeolukorrast.

LabVIEW võimaldab teha ka sobiva kasutajaliidese ehk paigutada vastavalt vajadusele ja nõuetele indikaatorid ning nupu, valida neile õige kujutamisiis ning suurus ja värv. Andmehõiveseadmega suhtlemiseks on programmi koostamisel kasutatud ka alamprogramme, mis on koostatud tootja poolt.

Tarkvara valmis etappide kaupa. Esimeses etapis loodi võimalus kontrollida mootori pöördeid ehk teisisõnu oli vajalik genereerida PWM signaali, mis oleks vastuvõetav mootori kontrolleri jaoks. Antud juhul tuli jälgida, et pulsi pikkus jääks vahemikku 1 kuni 2 ms ning periood 20 ms. PWM signaali juhul on oluline jälgida täitetegurit, mis leitakse järgneva valemiga 4.2 [14]:

$$D = \frac{PW}{T} \times 100\% , (4.2)$$

kus D – täitetegur;

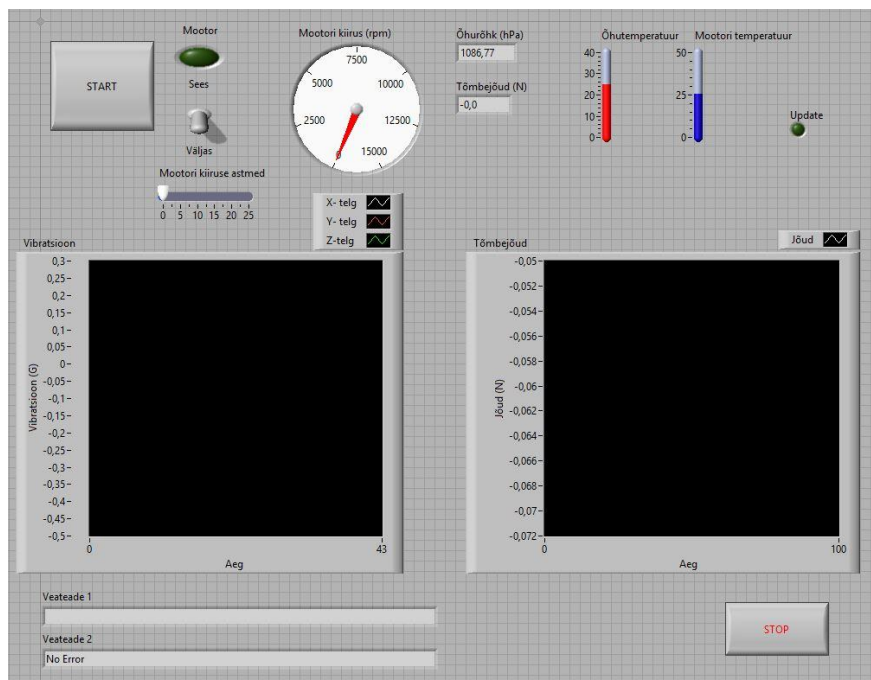
PW – impulsi pikkus;

T – periood.

Harjadeta mootori kontrollimise puhul peab seega täitetegur jääma 5-10% vahele. 5% puhul on mootori koormus minimaalne ning 10% puhul maksimaalne. [14]

Seadme käivitamisel peab jälgima, et pöörete regulaator oleks seatud minimaalsetele pööretele, vastasel juhul mootor ei käivitu, kuna kontrollir saab vale sisendi.

Teises etapis loodi sisendid erinevatele anduritele (õhurõhk, õhu- ja mootori temperatuur, mootori pöörded, vibratsioon, tõstejõud). Kolmandas etapis loodi võimalus andmete tekstifaili salvestamiseks. Failis on andmed omavahel eraldatud tabulaatoriga, mis võimaldab hiljem lihtsalt andmeid kopeerida tekstifailist tabelitöötlusprogrammi ning seal vajadusel suuremal hulgal andmeid töödelda (näiteks graafikuid luua). Viimases etapis anti programmile lihtsam kasutajaliides ning loodi kolm alamprogrammi, mis võimaldas hoida põhikoodi lihtsamal kujul. Loodud alamprogrammid hõlmasid endas faili salvestamist, PWM signaali genereerimist ning analoogsisenditest info lugemist.



Joonis 11 - Programmi kasutajaliides

Olulisematest keskkonnatingimustest kasutajale ülevaate andmiseks on tarkvaras mootori temperatuuri skaala loodud kolmevärvilisena:

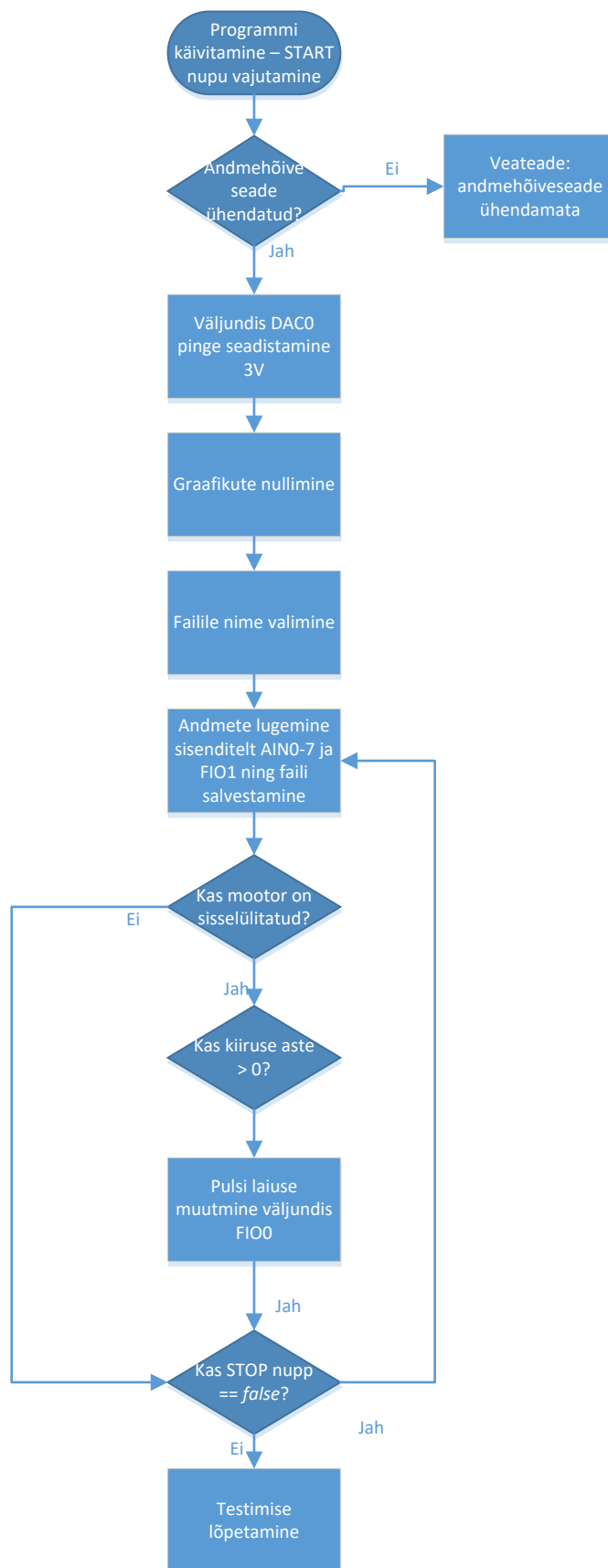
- kuni 30°C – sinine;
- 30°C – 70°C – roheline;
- Üle 70°C – punane.

Testimise läbiviimise protsess on järgnev:

1. Ühendada elektroonikaplokk EP-1 toiteallikaga. Selleks võib kasutada 12V alalispinge toiteadapterit või 12V akut;
2. Ühendada signaalkaablite pistik LabJack andmehõiveseadmega;
3. Ühendada andmehõive seade arvuti USB-pessa;
4. Avada arvutis programm (prototüübi puhul on nõutav LabVIEW *Run-Time Engine* ja LabJack tarkvara olemasolu);
5. Lülitada sisse EP-1 toide (lüliti ploki peal);
6. Ühendada liitiumpolümeeraku mootori kontrolloriga (ESC);
7. Käivitada programm (START nupp), sisestada faili nimi ning klõpsata kasutajapaneelil olevat nuppu mootori sisse lülitamiseks;
8. Mõõduka kiirusega tõsta mootori pöördeid (muutes kiiruse astmeid);
9. Lõpetamisel tuua kiiruse reguleerimine nulli ning vajutada STOP nuppu.

Katsetuste korraldamise kohta tuleb hoolikalt valida ohutuse tagamise eesmärgil, kuna tegemist on väga kiiresti pöörlevate labadega. Võib juhtuda, et testimise käigus propeller puruneb ning selle lennusuunda on keeruline ennustada. Samuti peaks operaator kandma kaitseprille.

Joonisel 12 on kujutatud loodud tarkvara voodiagramm. Programmi käivitamisel ning START nupu vajutamisel kontrollitakse andmehõiveseadme olemasolu. Puudumisel kuvatakse veateade. Kui seade ühendatud, pingestatakse andmehõiveseadme väljund DAC0 3V. See on kiirendusanduri toide. Edasi toimub graafikute nullimine (st kustutatakse eelnevad tulemused), kasutajal on võimalik valida loodavale failile nimi ning algab andmete lugemine sisenditelt AIN0-AIN7, misjärel salvestatakse need faili. Tsükli järgmises etapis kontrollitakse mootori sisselülitamise nupu väärtust, tõese tulemuse korral kontrollitakse, kas kiiruse aste on suurem kui 0. Kiiruse astme muutmisega on kasutajal võimalik reguleerida mootori pöördeid muutes pulsi laiuse väärtust väljundis FIO0. Lõpuks kontrollitakse STOP nupu väärtust ja kui seda pole vajutatud, siis liigutakse tagasi andmete kogumise faasi ja tsükkel algab uuesti.



Joonis 12 - Tarkvara voodiagramm

5. Tulemused

5.1. Süsteemi seadistamine

5.1.1. Jõuanduri seadistamine

Jõuanduri reguleerimine, *offseti* nullimine - vastavalt instrumentaalvõimendi INA114 andmelehele tuleb õige võimendusastme leidmiseks kasutada vastavat takistit R_G integraallülituse kontaktide 1 ja 8 vahel [15]. Võimendusteguri leidmine on võimalik kasutades järgnevat valemit 5.1 [15]:

$$G = 1 + \left(\frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \right), (5.1)$$

kus G – võimendustegur;

R_G – takisti väärtus, millest sõltub võimendusaste.

Teades soovitud võimendustegurit, on meil võimalik teisendada eelnevat valemit 5.2, et leida sobiv takisti:

$$R_G = \left(\frac{50 \text{ k}\Omega}{G-1} \right), (5.2)$$

Kuna pingemuutus jõuanduri väljundis jääb mõne millivoldi piiresse, siis tuleb kasutada võrdlemisi suurt võimendustegurit – 228. Sobiva takisti leidmise käigus sai kasutatud trimmeri abi, kuna sellisel juhul on väga täpselt võimalik leida sobiv võimendustegur. Orienteeruv piirkond sai arvutuslikult paika ning seejärel leiti sobiva trimmeri kasutamisega juba täpne väärtus.

Järgmises etapis tuli veenduda, et tarkvaras kuvatav tulemus vastab tegelikule raskusjõule. Selleks sai kasutatud veega täidetud kanistreid, mille kaalus oli eelnevalt veendutud. Kuna tegemist on prototüübiga ning raskusjõu määramine pole grammise täpsusega vajalik, siis veekanistri kaalu määramiseks kasutati taatlemata kaalu KERN DE 15K2D. Saadud tulemused olid järgmised:

- 0 kg – tarkvaras kuvatav tulemus 0,05 N;
- 5 kg – tarkvaras kuvatav tulemus 50,03 N.

Esialgselt oli tarkvarasse kirjutatud $1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$, hiljem muudeti see täpsemaks: $1 \text{ kg} = 9,81 \text{ N}$.

5.1.2. Mootori pöörete kontroll

Kuna testimise eesmärgi saavutamisel on oluline salvestada ka mootori pöörete arv, siis tuli veenduda, et tarkvaraliselt saadud tulemus oleks vastavuses reaalse pööretega. Tarkvaras on

võimalik valida 25 erinevat kiiruseastet. Kontrolli käigus jaotati eelnevalt nimetatud vahemik võrdseteks osadeks ja võeti 6 punktist (kiiruse astmed: 1, 5, 10, 15, 20 ja 25) tulemused.

Kiiruse aste	Digitaalse tahhometri tulemus (rpm)	Tarkvaras kuvatav tulemus (rpm)
1	5500	5503
5	10275	10273
10	12105	12103
15	12690	12690
20	12980	12978
25	13410	13410

Tabel 1 - Mootori pöörete kontroll

Digitaalseks tahhomeetriks valiti PeakTech 2790, mis omas kehtivat tehase kalibreerimistunnistust. Mõõtmise protsessi käigus lasti igal kiiruse astmel töötada 5 sekundit ning tarkvaras salvestatud tulemuste hulgast võeti keskmine väärtus.

5.1.3. Kiirendusanduri seadistamine

Kiirendusandur paikneb mootorile võimalikult lähedal. Prototüübil on see kinnituskoht mootori kinnitusraami poldi all. Vastavalt kiirendusanduri andmelehele muutub anduri väljund proportsionaalselt vastavalt kiirenduse muutusele – 0,3 mV/G [16]. Iga telje suhtes on reaalselt mõõdetud väärtus täpsemalt välja toodud:

- X-telg – 0,3025 mV/G
- Y-telg – 0,305 mV/G
- Z-telg – 0,300 mV/G

Lubatud vibratsiooni muutuse amplituud sõltub kasutatavast mootorist ning rakendusest. Näiteks ventilaatorite või käigukastiga mootorite puhul kehtivad erinevad piirmäärad. Antud lõputöös võetakse aluseks standard AC/DC mootor ning amplituudi suuruseks 0,35 G (RMS). [17]

5.1.4. Temperatuurianduri seadistamine

Temperatuuriandur on mootori mähistega otseses kontaktis ja mõõdetakse staatori mähiste temperatuuri. Temperatuuriandurite LM35 seadistamisel tuli lähtuda väljundpingest 10mV/°C [18]. Nimetatud väärtus sai sisse kirjutatud tarkvarasse.

5.2. Testid erinevate propelleritega

Testimisel kasutati kuut erinevat propellerit:

- plastpropeller mõõtmega 10 x 4,5 tolli;
- plastpropeller mõõtmega 11 x 4,7 tolli;
- plastpropeller mõõtmega 11 x 5,5 tolli;
- plastpropeller mõõtmega 12 x 4,5 tolli;
- puitpropeller mõõtmega 13 x 4 tolli;
- plastpropeller mõõtmega 13 x 4,7 tolli.

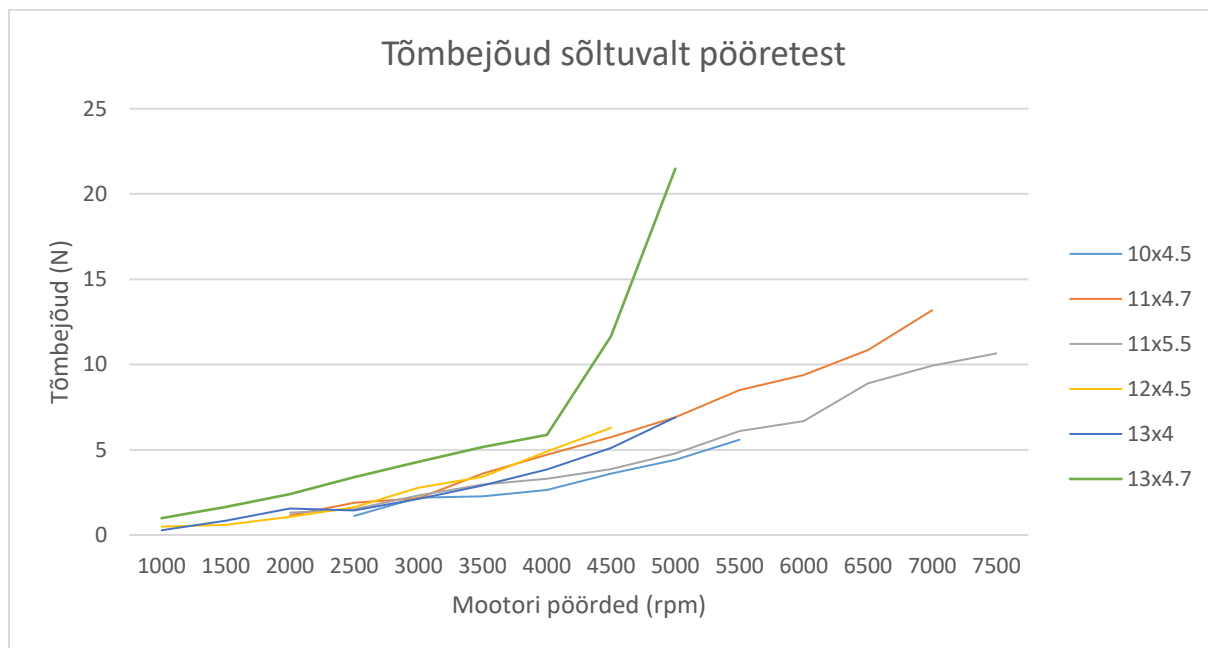
Testimine viidi läbi siseruumis, mille õhutemperatuur oli keskmiselt 21°C ja õhurõhk 1100hPa. Mootori temperatuur tööolukorras varieerus vahemikus 20°C kuni 35°C. Pärast propelleri seiskamist toimus mootori temperatuuri tõus ca 5°C. Siit ka soovitus, et pärast suurel koormusel testimist, tuleks lasta mootoril käia madalatel pööretel, et liikuv õhuvool jahutaks mootorit.

Mootori pöörete valikul tuleks arvesse võtta kasutatava propelleri diameetrit, kuna sellest parameetrist sõltub propelleri tipu kiirus. Kui tipu kiirus läheneb helikiirusele (343 m/s [19]), siis propelleri purunemine on väga tõenäoline. Katsete tegemise käigus purunes plastpropeller mõõtmega 11 x 4,7 tolli, kui propelleri tipu kiirus oli 146 m/s. Sellest tulenevalt võib järeldada, et väga keeruline on hinnata erinevate propellerite vastupidavust ning seetõttu jäi katsete käigus mootori pöörete maksimaalseks väärtuseks 7500 rpm. Autori hinnangul võiksid süsinikust või klaasriidest valmistatud propellerid olla oluliselt vastupidavamad kui plastpropellerid.

Katsete kokkuvõte on kujutatud joonisel 12. Kuna katsete korraldamisel kogutud andmehulk oli väga mahukas, siis kokkuvõtte tegemiseks võeti iga 500 pöörde tagant mõõdetud tõmbejõu väärtused ning tulemustest arvutati keskmine. Kõige suurema tõmbejõu tekitas plastpropeller mõõtmega 13 x 4,7 tolli. Antud propelleri mõõdetulemused erinesid teistest ka sellepoolest, et umbes 4000 rpm juures toimus järsk tõmbejõu suurenemine. Teiste propellerite tulemused olid üsna võrdsed ning äkilist tõmbejõu muutust ei täheldatud. Tasub veel ära märkida, et plastpropellerid tekitasid tööolukorras rohkem müra kui puidust valmistatud propeller. Mõõtmiste käigus oli kuulda teatud vilinat. Ilmselt tekitas kõrvalist heli plastpropelleri läbipaindumine suurema koormuse all.

Nii nagu lennukil võib tiib teatud olukorras variseda, siis sama juhtub ka propelleriga. Antud katsete käigus ei testitud olukorda, kus propelleri poolt tekitatav tõmbejõud hakkab vähenema ning seetõttu ei määratud veel iga propelleri pöördeid, mille juures tõmbejõud on maksimaalse

väärtusega. Seda on plaanis teha hilisemas faasis, kui prototüübi valmimisel on kõik murekohad välja tulnud.



Joonis 13 - Erinevate propellerite poolt tekitatav tõmbejõud sõltuvalt mootoripöõretest.

5.3. Edasised plaanid

Edasised plaanid hõlmavad endas arendustöid nii tarkvaralises kui ka riistvaralises pooles. Tarkvaras tuleb täiendada funktsionaalsust, mis võimaldab mõõta mootori poolt tarvitatavat pinget ja voolu. Samuti peaks välja töötama automatiseeritud mõõteprotsessi, mis võiks välja näha järgmiselt:

- Operaator paigaldab testitava propelleri mootori külge;
- Ühendab süsteemi vooluallikatega ning lülitab sisse;
- Avab arvutis tarkvara ning käivitab mõõteprotsessi;
- Protsessi käigus toimub automaatselt sujuv kiiruse tõstmine kuni maksimumini ning seejärel kiiruse langetamine miinimumini, lõpuks mõõdetud parameetrite kirjutamine faili;
- Protsess peaks katkema olukorras, kus:
 - vibratsiooni suurus ületab etteantud piirnormi;
 - LiPo aku elementide pinge pole enam piisav toitmaks mootorit;
 - Mootori mähiste temperatuur ületab piirnormi;
- Katkestuse järel kuvatakse operaatorile seiskumise põhjus.

Riistvara osas tuleb joonestada trükkplaadi skeem ning luua konkreetselt sellele seadmele vajalike komponentidega trükkplaat. Prototüübi tegemise ajal sai selgeks tehtud vajalikud komponendid ning väliste andurite arv. Lisaks trükkplaadi arendusele tuleb luua pistikühendused erinevate väliste komponentide (andurid, mootor, kontrollid, toited jms) jaoks. Ohutuse seisukohalt on oluline välja töötada propellerile kaitsevõre, mis ühelt poolt oleks piisavalt tugev, et purunenud propelleri löögijõule vastu pidada, teiselt poolt jällegi võimalikult kerge ja ei takistaks liialt propelleri poolt tekitatavat õhuvoolu.

Mõõtmiste teostamise osas tuleks testida süsteemi vaakumkambris, kus on võimalik õhurõhku sujuvalt alandada. Sellises olukorras saaks juba täpsemalt määrata, kuidas hõredamas õhus propellerite poolt tekitatud tõmbejõud muutub.

Kuna seade on mobiilseks ehitatud, siis on võimalik teostada ka dünaamilise tõmbejõu mõõtmist. Seda näiteks tuuletunnelis või esmaste hinnangute saamiseks kasvõi mõne liikuva sõiduki katusel. Sellisel juhul oleks võimalik tulemusi koguda mehitamata lennukite jaoks, kuna nendel on päri- või vastutuule poolt tekitatud tõmbejõu muutus arvestatav.

Kokkuvõte

Kui veel mõned aastad tagasi polnud saadaval kommertsilahendusi, millega oleks võimalik mõõta nii mootori tõmbejõudu kui ka muid parameetreid, siis praeguseks on juba mitmeid võimalusi ning nende hind varieerub sõltuvalt funktsionaalsusest. Selliste mõõtmistulemuste teadasaamise on tinginud olukord, kus mehitamata õhusõidukite kättesaadavus on oluliselt paranenud, lihtsamaid seadmeid on võimalik soetada isegi mõnekümne euro eest. See aga toob kaasa olukorra, kus on vaja tõsta inimeste teadlikkust omandatud õhusõiduki parameetrite kohta – täpsemalt tõmbejõu kohta.

Lõputöö tegemise jooksul valminud seade on sobilik mõõtma mehitamata õhusõidukitel kasutatavaid elektrimootoreid ja propellereid, mille koosluse tulemusel tekitatav tõmbejõud on kuni 50 N. Testimiseks valiti kuus erinevat propellerit ning selgus, et alati ei taga parimat tõmbejõudu võimalikult suur propelleri samm, vaid oluline on vaadata süsteemi tervikuna, st hinnata propellerit ja mootorit koos. Propelleri puhul on oluline jälgida ka diameetrit. Testimisel oli olukordi, kus suurema sammu ja väiksema diameetriga propeller andis väiksema tõmbejõu kui väiksema sammu ja suurema diameetriga propeller.

Kui lähtuda vaid hobi korras kasutatavatest mehitamata õhusõidukitest, siis on olukordi, kus testimine pole mõistlik ning lennatakse ilmselge tõmbejõu varuga. Samas eksisteerib olukordi, kus efektiivsus on oluline ning propelleri ja mootori valikul tuleks olla täpne, et mitte kulutada liialt palju raha jõuallikale, kui tegelikkuses vajadust sellise ressursi järele pole.

Prototüübi valmimise järel tuli välja erinevaid ideid, mida järgmise versiooni tegemisel ellu võiks viia. Näiteks erinevad andurid ja välised seadmeid peaksid olema pistikutega elektroonikaploki külge ühendatud. Lisaks sellele tuleks luua konkreetselt sellele rakendusele mõeldud trükkplaat – see muudaks kindlasti signaali edastust kvaliteetsemaks ning vähendaks müra.

Kokkuvõtvalt sai lõputöö eesmärk täidetud. Projekteeritud ja konstrueeritud süsteem täidab oma kasutamise eesmärgi ning seadmega on võimalik testida erinevaid mootoreid ja propellereid.

Tänuavaldused

Sooviksin tänada oma lõputöö juhendajat, Teet Tilka, kes aitas kaasa lõputöö valmimise protsessile. Lisaks sooviksin tänada õppejõud Sebastian Vielhauerit, kelle juhendamisel sai LabVIEW keskkonnas kirjutatud programm täiendavat funktsionaalsust.

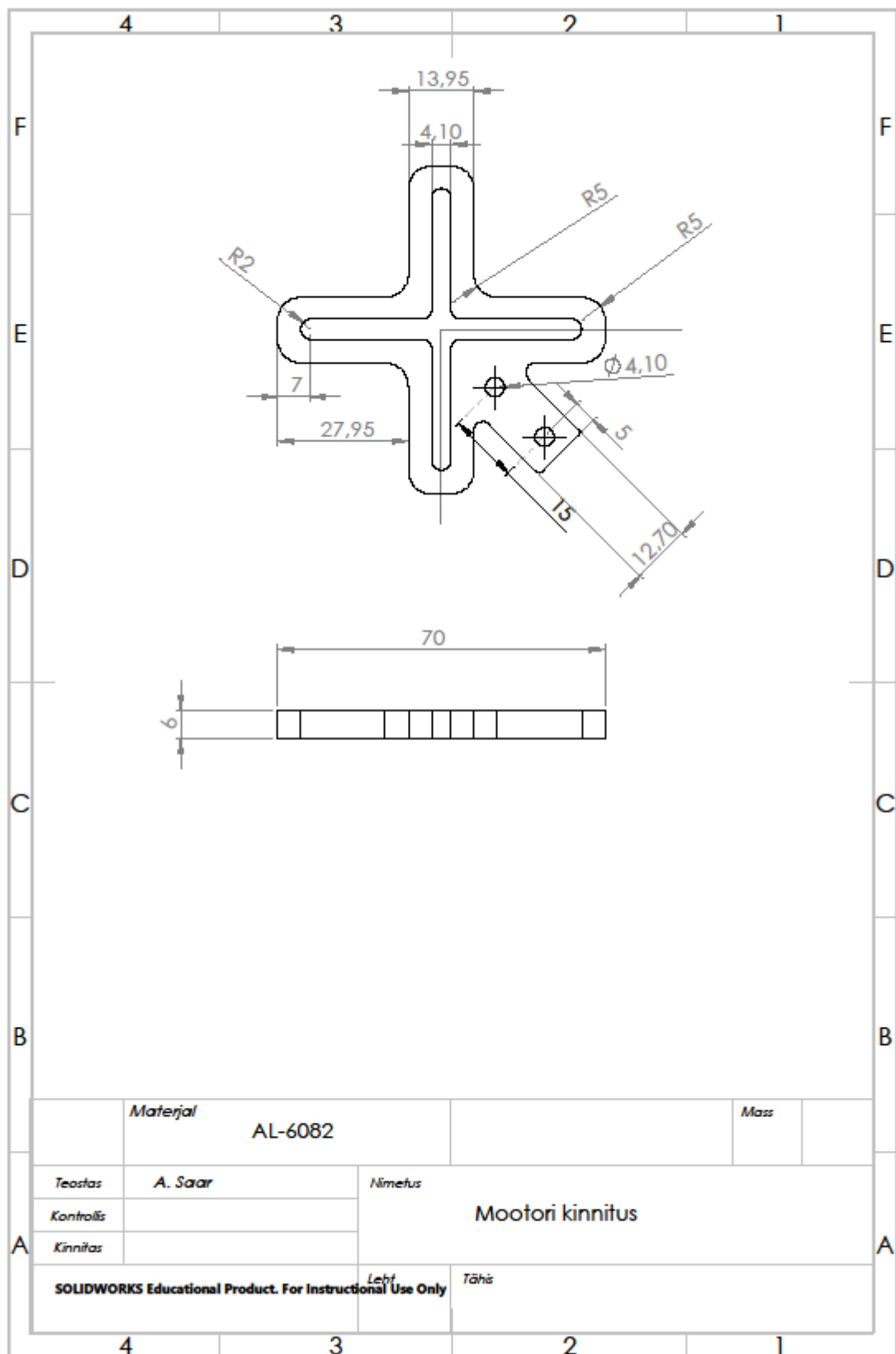
Viited

- [1] „Drone Life,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://dronelife.com/2016/07/19/8-incredible-drone-industry-stats/>. [Kasutatud 13 04 2017].
- [2] „Global Research,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.globalresearch.ca/unmanned-aerial-vehicles-uav-drones-for-military-and-civilian-use/5374666>. [Kasutatud 13 04 2017].
- [3] „Riigihangete register,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://riigihanked.riik.ee/register/hange/185628>. [Kasutatud 25 04 2017].
- [4] J. Susi, *Õppematerjal - Propeller - peatükk 6*, Eesti Lennuakadeemia, 2017.
- [5] G. Staples, „Propeller static dynamic thrust equation background,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.electricrcaircraftguy.com/2014/04/propeller-static-dynamic-thrust-equation-background.html#.VTOgk47baOU>. [Kasutatud 09 05 2017].
- [6] „Threod Systems,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.threod.com/products/uas-theia/theia-description>. [Kasutatud 23 03 2017].
- [7] „Brushless vs. brushed motors,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ttmotor.com/techshow.php?id=11&sid=2>. [Kasutatud 12 05 2017].
- [8] „DroneTrest,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>. [Kasutatud 30 03 2017].
- [9] „FOXTech,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.foxtechfpv.com/sunnysky-281410-kv-800-motor-p-1286.html>. [Kasutatud 30 03 2017].
- [10] „Buddy RC,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.buddyrc.com/sunnysky-v2814-10-800kv-brushless-motor.html>. [Kasutatud 30 03 2017].
- [11] „How to choose the right motor for your multicopter drone,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.dronetrest.com/t/how-to-choose-the-right-motor-for-your-multicopter-drone/568>. [Kasutatud 01 05 2017].
- [12] „Wheatstone'i sild,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/3432/en/>. [Kasutatud 03 05 2017].
- [13] „LabJack,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://labjack.com/support/datasheets/u6/hardware-description>. [Kasutatud 10 04 2017].
- [14] „Wikipedia - Pulse Width Modulation,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation. [Kasutatud 05 04 2017].

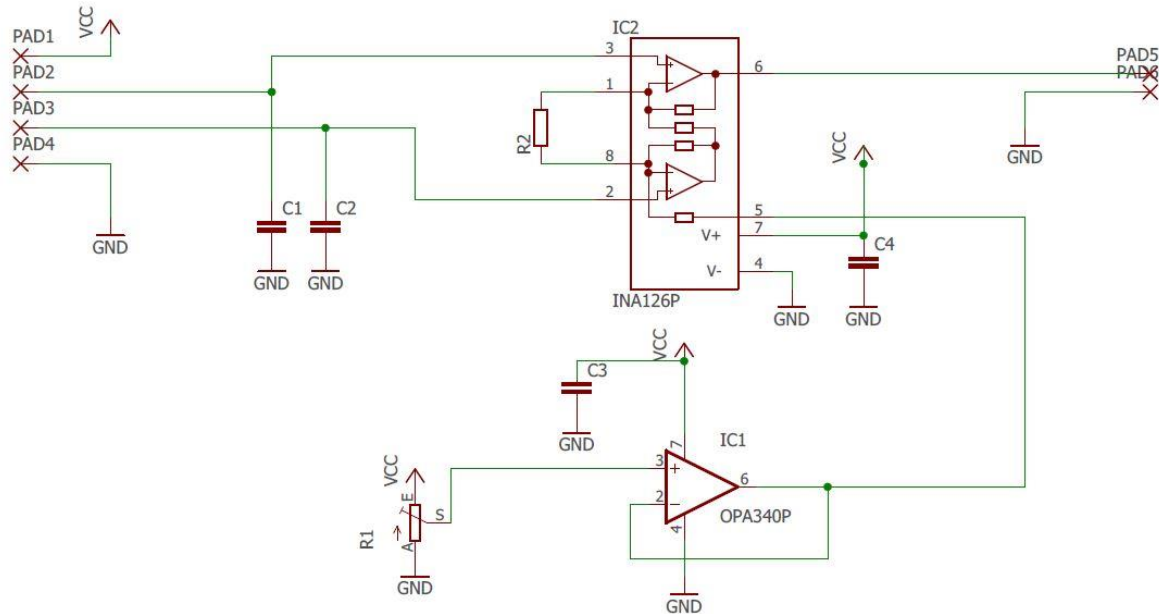
- [15] „Texas Instruments INA114AP datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>. [Kasutatud 10 04 2017].
- [16] „ADXL335 (Rev. B),“ [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>.
[Kasutatud 27 04 2017].
- [17] „GENERAL MOTORS / DELPHI VIBRATION STANDARD FOR THE
PURCHASE OF NEW and REBUILT MACHINERY AND EQUIPMENT,“
[Võrgumaterjal]. Available:
[http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942964490873
/filePointer/399590942964855559/fodoid/399590942964855557/GM_Vibration_Spec_
V1.0a-1999.pdf](http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942964490873/filePointer/399590942964855559/fodoid/399590942964855557/GM_Vibration_Spec_V1.0a-1999.pdf). [Kasutatud 27 04 2017].
- [18] „LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors,“ [Võrgumaterjal]. Available:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. [Kasutatud 27 04 2017].
- [19] „Speed of Sound - Wikipedia,“ [Võrgumaterjal]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound. [Kasutatud 12 05 2017].

Lisad

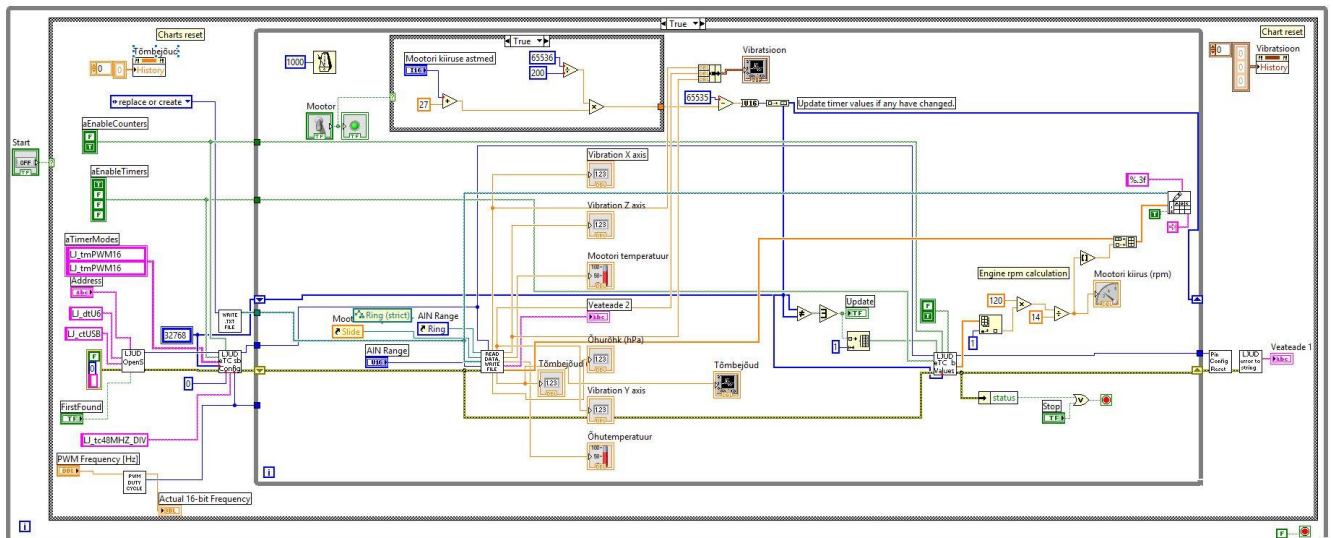
1. Lisa – Mootori kinnituse joonis



2. Lisa – Jõuanduri signaali võimendamise elektroonikaskeem



3. Lisa – Programmi kood



4. Lisa – Programm

Lisatud eraldi failina: Staatilise tõmbepõu stand.zip

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ahti Saar

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

“Staatilise tõmbejõu stend mehitamata õhusõidukite elektrimootoritele”

mille juhendaja on Teet Tilk

- a. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autori õiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - b. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **17.05.2017**